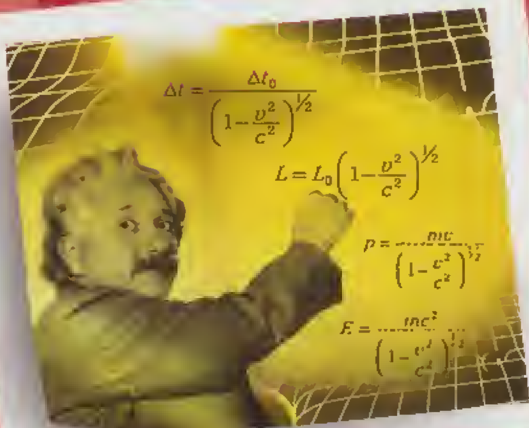
ثمرات من دوحة المعرفة



30.1.2013

ما النسبيّة؟

فرانسوا فلنوتشي



ترجمة :

د. عز الدين الخطابي





ثمرات

من دوحة المعرفة

فرانسوا فاتوتشي

ما النِّسْبِيَّة؟

ترجمة:

د. عز الدين الخطابي

مراجعة:

د. فريد الزاهي



الطبعة الأولى 1433هـ 2012م
حقوق الطبع محفوظة

QC173.55 .V312 2012
Vannucci, F. (Francois)
[Qu'est-ce que la relativite]
ما النسبية ؟ / تأليف فرانسوا فانوتشي : ترجمة عز الدين الخطابي : مراجعة فريد الزاهي- أبوظبي: هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة، كلمة، 2012.
ص 73 ؛ 10×16 سم.
(سلسلة ثمرات من دوحة المعرفة)
ترجمة كتاب: Qu'est-ce que la relativite?
تدمك: 978-9948-17-035-8
1 - النسبية (نظرية)
أ-خطابي، عز الدين. ب-زاهي، فريد.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الفرنسي:
François Vannucci
Qu'est-ce que la relativité ?



www.kalima.ae

ص.ب: 2380 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، هاتف: 451 6515 2 971+ فاكس: 127 6433 2 971+



ما النِّسْبِيَّة؟

المحتويات

تقديم

سمعنا كلنا بالنسبية Relativité وأرجعناها جميعنا إلى أينشتاين Einstein، فنحن مدينون له بإنجازه لثورة حقيقية في طريقة تصورنا للكوْن. هكذا، ففي دماغ مستخدم بمكتب براءة الاختراع بالعاصمة السويسرية بيرن Berne، تغير شكل المكان وفقد الزمان خاصيته الإطلاقية.

تبدو هذه المفاهيم تأملية بشكل كبير وبعيدة عن الفهم المشترك. ومع ذلك، فقد أدت بنوع من المعجزة، إلى تطبيقات تِقانية مفيدة، تُيَسِّر لنا حياتنا اليومية.

كيف تحقق ذلك ؟

لكي نفهم نتائج هذه النظرية التي نشر أينشتاين عناصرها الأولى سنة 1905، يجب علينا العودة إلى القرن السابع عشر، حيث انبثق مفهوم النسبية مع غاليلي Galilée.

1) النسبية أو الدعوة إلى السفر

ليست الأرض مركزاً للكون، فهي في الواقع خاضعة لحركة مستمرة داخل الكوْن، بل باستطاعتنا الحديث بشأنها عن «حراك Bougeotte». إنها لا تدور حول نفسها وحول الشمس فقط، بل إن النظام الشمسي في مجموعه يتحرك حول مركز المَجَرَّة التي «تقع» وسط مائة مليار من المجرّات الأخرى المُشَكِّلَة للكون. لذلك، لا توجد نقطة ثابتة يمكن الاستناد عليها، فكل هذه الحركات تولِّد الدُّوَار.

الأرض عبارة عن رحّالة كبيرة، وهي تجرنا معها في سباقها الجنوني. ومع ذلك، فنحن لا نشعر بأي شيء عملياً، إذ كل شيء يحدث وكأن الأرض ثابتة. لكن، إذا ما افترضنا كما فعلت فيزياء القرون الوسطى، بأنها ثابتة فعلاً، فإنها ستشغّل وضعاً

مركزياً وسيدور الكوْن حولها. وقد سعى غاليلي إلى تدقيق حُججه ضد هذه الفرضية. ولهذا الغرض، قام بتوضيح مفهوم الثبات متسائلاً: «بالنظر إلى أي شيء سيكون هذا الثبات قائماً؟». ومعلوم أن هذا العالِم الفيزيائي ولد بمدينة بيزا Pise وهي مدينة شاطئية، لذلك كان معتاداً على رؤية السفن وهي تغادر الميناء، مما مدَّه بالعناصر الأولى لتأملاته. فقد لاحظ بأن الشيء الساكن داخل سفينة مبحرة، ليس ساكناً بالنظر إليه كملاحظ بالميناء. وهذا أمر بديهي، فطافية النجاة المعلقة بالسفينة تبدو ثابتة للبَحَّار المجاور لها ومتحركة من منظور اليابسة.

لهذا، فإن مفهوم الثبات يظل نسبياً، ولوصفه يتعيَّن تحديد الثبات بالنسبة لأمر آخر. في هذا الإطار، يمكن للبَحَّار أن يتساءل عما إذا لم يكن الميناء هو المُبْحر! كما أن الأرض تبدو لنا ثابتة، وهذا مجرد انطباع؛ فهي متحركة بالنسبة للنجوم. وللإشارة،

فقد كان من اللازم انتظار القرن التاسع عشر، لتأكيد هذا الأمر تجريبياً. لكن، إذا كان الثبات نسبياً، فماذا عن الحركة ؟ لنوضِّح هذه المسألة، مستشهدين بتحرك بسيط. أنا أتجول بخطى عادية فوق رصيف مستقيم بشارع. **وبنجمة سِيْرِيُوس [الشّعْرى] Sirius يتجسس** علي أحدهم مستعملاً منظاراً قوياً. لكنه سيضطر إلى متابعة مسيرٍ ملتوٍ بشكل كبير. ويرجع ذلك إلى كون نقطة ملاحظته ليست ثابثة بالنسبة للأرض. هكذا، فإن الحركة نفسها تحلَّل بشكل مختلف من قِبل ملاحظين مختلفين.

سيقوم غاليلي بتدقيق هذه المسألة، فقد تصور سكيناً منفلتةً من يد بحار موجود فوق سارية السفينة التي تبتعد عن اليابسة بسرعة ثابثة. وتساءل في هذا الإطار: أين ستسقط السكين؟ إن جواب البحار سيكون واضحاً، فالأداة سقطت حسب خط عمودي نازل. لكن بالنسبة لمتجول يراقب

الميناء بمنظار دقيق، فإن السكين اتبعت مسيراً منْحنياً Parabolique، لأنها انفلتت بسرعة أفقية أولية تتجاوز الصفر، وهي سرعة السفينة المتحركة.

من هو إذن صاحب الجواب الحق؟ إن وجهتيْ النظر صحيحتان معاً، ذلك أن الحركة واحدة، لكن يمكن أن توصف إما من جهة السفينة أو من جهة اليابسة. أما النتيجة النهائية، فهي واحدة دائماً، لأن السكين ستسقط أسفل السارية؛ مع الإشارة إلى أن القياس انطلاقاً من السفينة، يقدم امتياز الحساب الأبسط. وإذن، فإن السفينة والميناء، يحددان إطارين مختلفين للوصف سنسميهما: **معالِم** Repères أو **مرجعيات** Référentiels.

تبيِّن هذه الأمثلة كيف يمكن للظاهرة نفسها أن تبدو مختلفة لملاحظين مختلفين، بحسب ثبات أو تحرك الشخص الذي يفحصها. وانطلاقاً من نتائج هذه الملاحظات، سيقرُّ غاليلي بأنَّ من الطبيعي أن

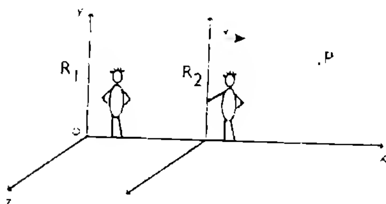
يكون الشيء في حالة سكون أو في حالة مستقيمة ومتماثلة، أي أن يتنقل بسرعة ثابتة بالنسبة لِمَعْلم معين [وتلك حالة السفينة بالنسبة لليابسة]. ويتناقض ذلك مع فكرة أرسطو التي مفادها أن الحالة الطبيعية للجسم هي أن يكون ساكناً، حيث لاحظ هذا الفيلسوف بأن شيئاً مقذوفاً به في مساحة معينة، لا بد وأن يتوقف في الأخير.

وقد صحَّح غاليلي هذا الحكم المسبق، مؤكداً بأن توقف الشيء عن التحرك، ناتج عن الاحتكاكات المتولدة عن التَّشَكُّلات المادية، بحيث تخلق هذه الأخيرة قوة احتكاك مقاومة للتقدم في المسير. ففي عالم نموذجي، سيستمر الشيء في مساره بسرعة ثابتة [كما هو الأمر بالنسبة لكرة متدحْرجة فوق طاولة مصْقولة]. ويسمى إطار هذا الوصف مرجعاً غاليلياً أو قصوراً **Inertie**؛ ومعناه أن الشيء الذي لا يتعرَّض لأي تأثير من قوة خارجية، يظل إما ساكناً وإما يتبع

حركة مستقيمة ومتماثلة. وطبعاً، فإن نظرية النسبية ستدقق صيغ الانتقال بين هذه المرجعيات.

ومن الناحية العملية، ستعرَف المرجعية بفضل ثلاث إحداثيات مكانية مجتمعة [أو مثلوث الإحداثيات Trois coordonnées] المعبر عنها بالرموز: x، y، z. وفي إطار هذا المَعْلم، تتجلى حركة الشيء بشكل متنوع وفْق زمن هذه الإحداثيات الثلاث التي سيتم اختيارها بحسب ثلاثة اتجاهات متعامدة Perpendiculaires.

وسنبين في الشكل التالي، تغير المَعْلم:



[تعتبر النقطة P المعلم الموضوع من قِبل الإحداثيات x_1، y_1، z_1 داخل R_1. وقد وضعت النقطة نفسها كمعلم، من قِبل الإحداثيات x_2، y_2، z_2 داخل R_2، علماً بأن هذا الأخير يتحرك بالنسبة ل R_1 بالسرعة V].

هكذا نرى مَعْلماً أوَّلاً وهو R_1، انطلاقاً من ملاحظة الذي يُفترض أنه ثابت، كما نرى مَعْلماً ثانيا وهو R_2 يجر معه الملاحظ الذي ينتقل بسرعة V المختارة على طول المحور Ox بالنسبة للمعلم R_1. وقد وضعت النقطة P نفسُها كموقع بالنسبة للإحداثيات x_1، y_1، z_1 داخل المعلم R_2. كل قياس على الأرض ينجَز إذن وفْق معلم يتم اختياره في ارتباط كوكبنا عموماً. ويفضل علماء الكواكب planétologues الذين يهتمون بالنظام الشمسي، اختيار معلم مرتبط بالشمس؛ أما المختصون في الفيزياء الفلكية Astrophysiciens فيفضلون مَعْلماً

مرتبطاً بالمجرّة. ويبدو المعلم الأرضي قريباً جداً من المعلم الغاليلي، لأن مختلف الحركات بالأرض هي من الضعف بحيث لا يمكن إهمالها أثناء معالجة المشاكل المألوفة. بإمكاننا اعتبار الأرض متحركةً بحسب مسير مستقيم ومتماثل بالنسبة لمعلم مرتبط بالنجوم الثابثة.

ستقوم النسبية بتحليل تأثير التحركات على الأشياء، مثلاً تغير طولها وكتلتها عند المرور من معْلم إلى آخر. طبعاً، ستعتبر بعض النتائج مألوفة، لأنها تؤكد تجربتنا اليومية وتقترن **بالنسبية المسماة غاليلية**. أما النتائج الأخرى فستكون محيِّرة أكثر، كما هو الشأن مثلاً بخصوص معدل الحياة الممتد بشكل كبير. وهو ما سيظهر عندما تصبح السرعة المستخدمة عالية جداً، وفي هذه الحالة سنتحدث عن **النسبية الأينشتاينية**. سيقرُّ الفيلسوف الذي تحرر من أوهام أحداث العالم بأن «كل شيء نسْبي».

لكن، علينا ألا نخلط بين الأمور؛ فالنسبية تفحص الظاهرة نفسَها التي تم تحليلها انطلاقاً من معْلمين مختلفين. وبالمقارنة، فإن النزعة النسبية Relativisme هي المذهب الذي تكون فيه المعرفة الإنسانية ذاتية، فهي بمثابة فقدان للمعالم. وفي مجال الفيزياء، تعتبر المعرفة نسبية، مادام كل قياس مرتبطاً بالشروط التي أنجز فيها؛ غير أن هذه النسبية تظل موضوعية، لأن النظرية توضّح لنا بالضبط صيغ الاستبدال التي يجب تطبيقها عندما نغير إطار الوصف. لذلك، فإن نظرية النسبية، ليست «نسبية» بالمعنى الذي تكون فيه نتائجها خاضعة لانفعالات اللحظة؛ فتوقعاتها دقيقة جداً ويمكن التحقق منها بشكل تام.

2- نتحرَّك أو لا نتحرك

لا تعتبر السفينة الشراعية في القرن السابع عشر التي قمنا بالسفر على متنها، وسيلة نقل سريعة جداً. وللتقدم أكثر في تحليلنا، سنخضع تغيرات المعلم لتحركات مسايرة للحداثة بشكل أكبر وسنستقِل قطاراً عالي السرعة TGV، يتحرك بسرعة محترمة، تناهز ثلاث مائة كيلومتر في الساعة. وإذا كنت أتنقل داخل القطار المتحرك، بخطوات جيدة، فإن سرعتي يمكن أن تناهز خمسة كيلومترات في الساعة. وهذه هي سرعتي بالنسبة إلى القطار. لكنها تعتبر شيئاً آخر بالنسبة لرئيس المحطة الثابت على الرصيف والذي يتابع مرور القطار من خلال النافذة. ومثلما هو الأمر في الشكل السابق، فإننا سنحدد معلماً مرتبطاً بالعربة وآخر مرتبطاً بالرصيف. بالنسبة لرئيس المحطة، فإنني أتحرك

بسرعة 300+5 =305 كيلومترات في الساعة. وهذه نتيجة مقترنة بما يدعى **بالتركيب الغاليلي** للسرعة. وبشكل عام، إذا كانت V_2 هي سرعة شيء ما داخل المعْلم R_2 [وهو القطار] الذي يتحرك بسرعة الجر V بالنسبة للمعلم R_1 [وهو الرصيف]، فإن سرعة ذلك الشيء بالنسبة ل R_1، V_1 ستكون هي $V+V_2=V_1$ [مع أخذ بُعْد واحد بعين الاعتبار]. وتؤكد هذه النتيجة تجربتنا اليومية فقط. فإذا كان قطاراًن يتحركان بسرعة مائة كيلومتر، في اتجاهين متقابلين وعلى سكتين متوازيتين، فإن المسافر في أحد القطارين، سيلاحظ تحرك القطار الثاني المقترب منه، بسرعة مائتي كيلومتر في الساعة. وهذا هو الفهم المشترك.

وعندما أمشي بخطوات ثابتة داخل قطار عالي السرعة، فإنني لا أملك أي إمكانية لتسريع الوتيرة، ما دام قياس هذا الأخير يربط تغير السرعة بالزمن؛

لذلك فإن السرعة الثابتة ستعني غياب التسريع. كما أنني لا أتوفر على إمكان التسريع، من منظور رئيس المحطة، على اعتبار أن سرعتي تظل ثابثة بالنسبة إليه أي مساوية لثلاث مائة وخمسة كيلومترات في الساعة. وتتغير وضعيتي خلال التحرك داخل كل معلم، كما تحدَّد سرعتي بشكل مختلف داخل هذا المعلم أو ذاك، لكن تسريع وتيرة سيْري يظل مساوياً لصفر في كليهما. ففي اللحظة التي بدأت فيها السير، انتقلت سرعتي داخل العربة من السكون أي صفر كيلومتر في الساعة إلى خمسة كيلومترات في الساعة؛ مع بقاء اختلاف السرعة هو نفسه. وهذا هو أساس **المبدأ النسبي**؛ ذلك أن قوانين الفيزياء تعبر عن نفسها في كل المعالم الغاليلية، بالشكل نفسه، مما ستكون له نتائج عملية هامة. إن التجربة المنجزة على الأرض والمتمثلة في رمي قذيفة، تسمح باستنتاج قوانين للحركة، صالحة في أي مكان.

وهذا أمر مفرح، وإلا ظلت قوانين الفيزياء منحصرة داخل محيطنا وحده. وتؤكد تجربتنا بأن الأحداث تتسلسل بشكل عادي داخل قطار يتحرك باتجاه مستقيم ومتماثل [أي غير خاضع للاهتزاز Vibrations]. هكذا، بإمكاننا السير وشرب القهوة والاشتغال على الكمبيوتر أثناء سير القطار. وإذا كانت الستائر مسدلة وكانت الحركة بدون اهتزاز، فلا شيء سيشير إلى أن القطار متحرك. وتبيّن هذه الملاحظة بأنْ لا وجود لمرجعية متميزة، فجميع المرجعيات متساوية عندما يتعلق الأمر بوصف ظاهرة ما، بحيث لا يمكننا أن نميز بين الساكن والمتحرك ضمنها. ثمّة على الدوام معلم يكون فيه الشيء في حالة سكون، وهو الذي يسافر مع هذا الشيء؛ وفي مثالنا السابق، يكون هو المرتبط بمسافرنا. في هذه الحالة، سنتحدث عن **المَعْلم الخاص** وذلك بالقدر الذي لا يوجد فيه معلم متميز، تكون

قوانين الفيزياء بداخله أساسيةً بشكل أكبر.

هكذا، سيكون الشيء ثابتاً داخل معلمه الخاص؛ لكن وكما رأينا، فإنه من الطبيعي أيضاً أن يكون متحركاً بشكل مستقيم ومتماثل. وبالتالي، فإن رئيس المحطة الموجود بالرصيف سيستنتج وهو يراني ماراً بسرعة ثلاث مائة كيلومتر في الساعة، بأنني ثابت داخل القطار.

والقوانين نفسُها تُطبّق في كل مكان، لكن صياغتها هي التي يمكن أن تختلف. فإذا ما رآني رئيس المحطة أمر بسرعة ثلاث مائة وخمسة كيلومترات في الساعة، فإن بإمكانه أن يستنتج هذه المرة، بأنني أسير بسرعة خمسة كيلومترات في الساعة بالنسبة للعربة، وذلك اعتماداً على أبسط مفاهيم تركيب السرعة.

لقد حدّدنا المَعْلم x، y، z، وتكلمنا أيضاً وبطريقة غير مباشرة عن الزمن t الذي يندرج ضمن السرعة.

ولوصف الحركة بشكل تام، فيجب علينا أن نكمل لائحة الإحداثيات المشتغلة، ويمكننا عندئذ الحديث عن «المَعْلم الرباعي الأبعاد» Quadridimensionnel للزمكان، وذلك عبر ربطنا بين x، y، z، و t (الزمان)، رغم أن مفهوم المكان ذي الأربعة أبعاد لا يصبح ملائماً إلا ضمن اعتبارات مستقبلية. وعند حدود الفكر الغاليلي، يبدو أن مرور الزمن لا يتغير بتغييرنا للمعلم، «فالزمن هو الزمن دائماً». وعلى سبيل المثال، فإن عقارب ساعتي داخل القطار فائق السرعة تدور بنفس سرعة عقارب ساعة رئيس المحطة. **ومدة الحدث** التي تقيس الفاصل بين لحظتين t و t' في تاريخ ظاهرة ما [بدايتها ونهايتها]، يعبَّر عنها بصيغة $\Delta t = t - {}'t$. وتعتبر قيمتها مستقلة عن المرجعية المختارة؛ ذلك أن مختلف المعالم الزمنية لا تتميز إلا باختيار مصدرها وهي الساعة «صفر» المتفق عليها. وتغيير معلم زمني، مثل المرور من

توقيت الصيف إلى توقيت الشتاء، لا يؤثر بتاتاً في توالي الأحداث.

إن كل هذه الاعتبارات تنتمي إلى مجال تطبيق النسبية الغاليلية. وفي هذا الإطار، يظل مثال القطار فائق السرعة كلاسيكياً. فمتى **سيظهر** أينشتاين؟

3- سرعة راسخة Imperturbable

عند نهاية القرن التاسع عشر، أحس الفيزيائيون بالرضى عن أنفسهم. فبعد ثلاثة قرون من التقدم المستمر، أصبح المجال الفيزيائي يفسر بصيغٍ أنيقة، ضمن نظريات تلك الفترة. وكان يكفي في نظرهم بذل مجهود صغير لتتضح كل أسرار الطبيعة في القريب، ولتصبح المعادلة النهائية، المفسرة للعالم في شموليته، في متناول الباحثين. ومع ذلك، بقي لغز محيِّر مرتبط مباشرة بمشكلة الحركة النسبية التي لا تندرج ضمن النظرية، وهي مسألة سرعة الضوء. فما موضوعها ؟

إن سرعة الضوء تساوي 299792,458 كيلومتر في الثانية، وقد تم قياسها بشكل دقيق حالياً. وهي ليست فقط نتاجاً لقياس، بل أساس تحديد المتر mètre الذي حلَّ محل القياس السابق المؤسَّس على وحدة قياسية

معدنية، تم اتخاذها نموذجاً [**étalon**] ووضعُها بمتحف سيفر Sèvres. ونظراً لأهمية هذه القيمة، فإنها استحقت اسماً معروفاً في المجال العمومي، رمز له بالحرف C. لكن، ما هو المعلم الذي تساوي فيه هذه السرعة C؟ لقد رأينا كيف أن سرعة الشيء تخضع للمعْلم الذي تقاس بداخله، وإذن ضمن أي مرجعية يتنقل الضوء بسرعته المعروفة؟

حسب تصورات القرن التاسع عشر، ينتشر الضوء داخل وسط ما مثل جزيئات الهواء، كما هو شأن الموجات الصوتية التي تقتضي حاملاً لنقلها. فلا يمكن لأي موسيقى أن تنتشر في الفراغ! ويجب أن يكون وسط نقل الضوء هذا شفافاً، كما يتعيَّن أن يملأ المكان بأكمله، ما دامت الإشارات تصل إلينا من أقاصي الكون الفارغ تقريباً من المادة. وقد سُمي هذا الوسط لأجل ذلك أثيراً. وقد استخدم القدامى هذا المصطلح للإشارة إلى العنصر الذي يملأ

الكون، أي الفضاء الموجود «فوق» القمر. ويشكل الأثير وسطاً غير قابل للفساد عكس العناصر الأربعة التي تشكل الأشياء الأرضية وهي: الماء، والنار، والتراب والهواء.

هكذا، يُفترض بأن سرعة الضوء تحدَّد بالعلاقة بالأثير الذي ينتشر فيه هذا الأخير؛ وهي المرجعية التي يمكن اعتبارها قبلياً ساكنةً بشكل مطلق، لأنها تملأ الفضاء برمته. وكانت الفرضية المقبولة في تلك الفترة، هي أن الأثير يسْند النظام الشمسي. وما دامت الأرض تتحرك داخل الكون، فإنها تتحرك بالعلاقة مع الأثير. وإذا ما كانت سرعة الضوء ثابثة بالنسبة لهذا الأخير، فإنها ستتأثر عندما يتم قياسها على الأرض. وهذه هي مشكلة الجدَّاف الذي يعبر النهر بقاربه، فالسرعة ستكون مختلفة بحسب ما إذا كان القارب يسير مع التيار أو يقاومه أو ينتقل عمودياً بالنسبة إليه. وبما أن الأرض تدور حول

نفسها بمحور القطبين على الخصوص، فإن C من اللازم أن تكون مختلفة بحسب الوجهة شمال– جنوب أو شرق–غرب.

ومن أشهر التجارب في هذا الإطار، تلك التي قام بها الباحثان الأمريكيان مايكلسن Michelson ومورلي Morley في نهاية القرن التاسع عشر. وكان الهدف من تجربتهما هو إبراز حركة الأرض بالعلاقة مع هذا الأثير الغامض، عبر قياس تغيُّر C تبعاً لتوجهات شعاع مضيء. وقد استخدما لهذا الغرض آلة بصرية حساسة جداً تسمى «قياس التفاعلات الضوئية» interféromètre، مزوَّدة بذراعين متعامدين، بحيث يأخذ أحدهما الوجهة شرق–غرب والآخر الوجهة جنوب– شمال. وينتشر الضوء في كل ذراع على خط مستقيم، كما تسمح **العدة** بإبراز الاختلاف الدقيق في سرعة الاتجاهين. وكان طول الذراعين أحد عشر متراً،

وهو ما يبدو ضئيلاً بالمقارنة مع الآليات الحالية، إلا أنه كان كافياً لبلوغ الدقة المطلوبة لكشف التأثير الناجم عن سرعة دوران الأرض حول نفسها والمقدَّرة في تلك الفترة بثلاثين كيلومتراً في الثانية، أي بواحد على عشرة آلاف من سرعة الضوء.

لكن النتيجة لم تسمح بكشف أي تغيُّر. وتكرر القياس وفق اتجاهات متعددة، كما أجريت الملاحظات ليلاً ونهاراً وبمختلف الفصول من دون نجاح؛ فقد ظلت سرعة الضوء متشبثة بقيمة ثابتة لا تتغير، متفاديةً قانون تركيب السرعة. وكان من الصعب تفسير هذه النتيجة. لكن من الممكن فهمها بافتراض أن الأثير يظل ثابتاً بالنسبة للأرض. لكن هذه الفرضية تقتضي بأن يكون لكوكبنا السابح داخل الكون وضع متمي؛ وهي الفكرة التي تم رفضها قبل ذلك بقرنين. وظل هذا اللغز الكبير قائماً خلال منعطف القرن التاسع عشر.

4- سفر إشكالي جداً

كان عمر أينشتاين يناهز السادسة والعشرين عندما نشر أول مقال له حول النسبية. ولم يشر فيه إلى تأثره بالنتائج التي توصل إليها مايكلسن ومورلي. وفي الواقع، فقد تساءل، وهو الذي كان يريد التأمل في «تجارب الفكر»، عما سيحدث مثلاً إذا ما تمكن شيء كالمرآة، من التحرك بسرعة الضوء. فالضوء بالنسبة لهذا الشيء سيكون ساكناً ولن يكون هناك أي انعكاس. وبذلك تصبح قوانين البصريات لاغية، وهو أمر يصعب قبوله. فهل يقدم لنا الضوء حالة لا يمكننا تحليلها في إطار الفيزياء السابقة ؟ ألا يستدعي الأمر حلاً جذرياً وجديداً؟

لقد حل أينشتاين المُعْضِلة بطريقة مفاجئة وجريئة، حيث أقر بمسلَّمتين. الأولى عممت مبدأ نسبية غاليلي، التي اعتبرت الفيزياء بمقتضاها واحدةً

إزاء كل مرجعيات **القصور**. بعد تحديد هذه المسلمة في الميكانيكا، أي في قوانين الحركة، سيتم توسيعها لتشمل كل الظواهر، الكهربائية منها والمغناطيسية والبصرية.

أما المسلَّمة الثانية فهي مرتبطة بالأولى، ومفادها أن الضوء ينتشر في الفراغ بسرعة ثابتة C، مستقلة عن حركة المصدر الضوئي أو عن الملاحظة. ليس ثمّةَ معْلم خاص بالضوء، وهو ما يتلاءم مع طبيعته التموُّجية، لأن الضوء لا يمكن أن يكون ساكناً.

وتبدو المسلمة الثانية صعبة التقبل؛ فهي ليست حَدسية وتخرق بوضوح الحس السليم، أي فيزياء غاليلي. وعلى أي حال، فإن أينشتاين سيتعرض على مر السنين لانتقادات الفلاسفة الذين سينعتون نظريته بـ«غير المعقولة»؛ ذلك أن الشخص الذي يقترب أو يبتعد عن مصدر الضوء مطالب بقياس سرعة الانتشار نفسها. وهو ما يتناقض مع

المفاهيم المألوفة. ففي النسبية الغاليلية، يتعين على الملاحظ المسافر على متْن مركبة فضائية متجهة نحو الشمس بأقصى سرعة، قياس السرعة المتزايدة لضوء الشمس المتجه نحوه. وهذا الأمر غير وارد في نسبية أينشتاين. وإذا ما قمنا بصياغة رياضية لذلك، مستخدمين التركيب الغاليلي للسرعة، فإننا سنحصل على C=V+C. ضمن هذا النطاق، فإننا إذا تصورنا ضوءين لليزر، متجهين أحدهما صوب الآخر، فسنحصل على: C=C+C وهذا أمر غريب، ومع ذلك فإن الطبيعة تخضع لهذه الغرابة الظاهرة.

لكن، وجب تصحيح قانون تركيب السرعة الذي أصبح غير مبرَّر بالمرَّة. إن فكرة ثبات سرعة الضوء C، تلغي تماماً مفهوم المعلم المطلق أو المفضَّل؛ إذ ليس هناك معلم وحيد تكون فيه سرعة الضوء هي C بالضبط، وليس هنالك أثير. وما دام كل ملاحظ

يرى تحرك الضوء بسرعة C، فإن كل وجهات النظر ستكون صحيحة أيضاً. وقد سبق أن تعرفنا على النتيجة نفسها مطبقةً على المعالم الغاليلية، لكن في إطار المكان وحده؛ في حين ظل الزمان مطلقاً.

مع إينشتان، لم يعد هناك مكان وزمان يحظيان بالأفضلية، ما دامت السرعة قد أُخذت بعين الاعتبار، كما لم يعد هناك تفضيل للمعْلم رباعي الأبعاد. وتبدو هذه الآراء مجردة، غير أن ثبات السرعة C، سيؤدي إلى وضعيات عملية مُفَارقَة. وهنا سيقدم مثالاً آخر، يتعلق بسفر ثانٍ أكثر خطورة، لأنه يستوجب التنقل عبر مركبة فضائية سريعة جداً، تقترب سرعتها من سرعة الضوء. وعلينا الآن ألا نخشى الفوارق الزمنية. فلدينا أخوان توأمان، بطرس Pierre وبولس Paul، افترقا في عيد ميلادهما العشرين عند مكان الانطلاق. هكذا، ركب بولس مركبة فضائية متوجهة إلى فيغا Vega

وهي نجمة تبعد عن الأرض بحوالي 25,3 سنوات ضوئية. وتمثل السنة الضوئية المسافة التي يقطعها الضوء خلال سنة، وهي تقريباً عشرة آلاف مليار كيلومتر. كما أن المركبة الفضائية ذات التكنولوجيا العالية، تتحرك بسرعة هائلة تقدر ب 0,99 C [أي قريبة جداً من سرعة الضوء]. وعندما وصل بولس إلى فيغا، كان عمره 23 سنة وستة أشهر، بمعنى أنه كان ما يزال شاباً. وطبعاً أراد أن يتعرف على أحوال أخيه بطرس؛ وسيعلم بأن هذا الأخير بلغ سن الخامسة والأربعين. أما الحكمة من وراء ذلك، فهي أن على المرء أن يسافر بسرعة فائقة كي يظل شاباً.

ما الذي حصل إذن؟ تبدو هذه النتيجة المحيِّرة عامة؛ فالزمن يمر بشكل مختلف، بحسب اختلاف المعالم. وهو يعتبر زمناً أطول للملاحظ الساكن، مقارنة بالملاحظ المسافر. بهذا المعنى نتحدث عن **التَمَدُد** dilatation. فالزمن المرتبط بمعلم خاص

يكون فيه الحدث ساكناً [المركبة الفضائية بالنسبة لبولس] يدعى زمنا خاصاً، وهو من أقصر الأزمنة التي يتم قياسها بخصوص الحدث نفسه [أي المدة الفاصلة بين انطلاق ووصول المركبة]. وستشير الساعة المتحركة دوماً، إلى زمن يمر ببطء؛ أما الأزمنة المحلية التي تقاس داخل المعلم نفسه، فتظل على حالتها.

ويقترن هذا التمدُّد الزمني بتقلص المسافات، حيث إن المسافة الفاصلة بين الأرض وفيغا تبدو أقصر لبولس المسافر. ومن الناحية العملية، فإن هذا الأخير، ورغم إنجازه لسرعة «التشبيب» فهو لن يستمتع بهذه المعجزة إذا ما عاد إلى الأرض. إنه خلال سفره، ظن بأنه يعيش بشكل عادي؛ وفي الواقع فإن كل عملياته، بما فيها البيولوجية، قد تأخرت مثل الساعة المحمولة معه؛ وإذا ما أراد أن يبرز شبابه لبطرس، فإن عليه الخضوع لتغيرات

قوية على مستوى المغْلم للعودة إلى الأرض، أي الخضوع **لتسارعات** عنيفة ستفقده كل ما حظي به من امتيازات، وهو ما يعني أنه سيشيخ على الفور.

5- أيها الزمن أوقف مسيرك

يعتبر مفهوم تمدُّد الزمن صعب الإحاطة عن طريق **الفهم المشترك** وحده. لكن علينا ألا نقلق، فهذا التأثير لا يدرك بمقاييسنا. وبالفعل، فقد أنجزت تجربة بواسطة ساعات ذرية دقيقة، موضوعة بداخل طائرات تفوق سرعتها سرعة الصوت، وتم التحقق من توقعات النسبية، بحيث إن الاختلاف بلغ 10^{-7} ثانية بعد دورة حول العالم. ولا يمكن الشعور بالتأثيرات إلا ضمن ظروف لا تكون فيها السرعة التي تم بلوغها، أقلّ من سرعة الضوء؛ وهو ما لا يمكن تحقيقه في الحياة الخارجية. والمجالان الوحيدان اللذان تطبق فيهما النسبية بشكل ضروري، هما فيزياء الجزيْئات والفيزياء الفلكية، أي العالم اللامنتهي الصِّغَر والعالم اللامنتهي الكِبَر، وهما من أبعد المجالات عن بعْدنا الإنساني. ويبرز تمدد الزمن

بالخصوص، لدى مسرِّعي القوة، أي لدى الأجهزة القادرة على تحريك الجزيئات الأولية بسرعة هائلة. والحال، أن العديد من هذه الجزئيات غير قارة، فهي تتفكك بعد مدة قصيرة من وجودها. مثلاً، إن الميون Muon، وهي جزيئة معروفة لأننا نجدها في الإشعاع الكوني الذي يسقط فوق رؤوسنا، تمتلك زمن حياة مقدراه 2,2 ميكروثانية micro secondes 2,2=t وهذه مدة ليست بالطويلة. وبالنسبة لميون منتشر بسرعة تناهز 0,995C، فإن مسيره يقارب 660 متراً: 0,995C× mètres 660=t. لكن المسيرات التي يتم قياسها عملياً هي أطول من ذلك. وبالفعل، فإن مدة 2,2 ميكروثانية تمثل مدة متوسط الحياة لميون في حال سكون، أي داخل معلمه الخاص، حيث يتم الميلاد والموت في نقطة وحيدة. لكن الميون يتحرك داخل المختبر، وستزداد مدة حياته لدى الملاحظ المرتبط بالأرض. هكذا سيبلغ مسيره سبعة

كيلومترات بخصوص سرعة 0,995C، وهي مسافة مقدَّرة بعشرة أضعاف الحساب الساذج؛ أو لنقل بصيغة أفضل، يبدو أن الميون يحيا عشر مرات أكثر، لدى الملاحظ الثابت بالمختبر؛ فهو يلعب دور بولس نفسه داخل مركبته الفضائية.

وفي الجانب الآخر من المعرفة الإنسانية، علينا الآن تصور ظاهرة انفجار نجمة شديدة اللمعان Super nova، تنبعث منها سحابة من الجزيئات خلال عشر ثوان عندما نلاحظها من مسافة قريبة. لكن مدة الانفجار ستبدو أطول، إذا كانت مسافة السحابة أبعد، وكأنها تبتعد عن الانفجار بسرعة كبيرة [مثلما ابتعدت المركبة الفضائية عن بطرس]؛ وذلك راجع إلى اتساع الكون، الذي سنتناوله فيما بعد. ونشير هنا، بأن النسبية تسمح بتقليص أو تمديد الأزمنة، لكنها لا تسمح أبداً بالعودة إلى الماضي، فتلك مشكلة فيزيائية مختلفة

لا يسمح المقام بشرحها.

منجهة أخرى، يثير مفهوم التزامن simultanéité، إحدى أكثر المفارقات إرباكاً. وهذا المفهوم لم يعد في النسبية مطلقاً، بل أضحى نسبياً. هكذا، ففي التعريف الكلاسيكي، يعتبر حدثان ما متزامنين، إذا ما وقعا في اللحظة نفسها بالضبط. وإذا وقعا في النقطة المكانية نفسها، فلا قول في ذلك. لكن، لنفترض أنهما حدثا في مكانين منفصلين، ولنستشهد مرة أخرى بمثال القطار عالي السرعة. بداخل هذا القطار يوجد مسافران بالعربة نفسها، حيث ستسقط على رأس كل واحد منهما حقيبة من رفّ الأمتعة. فإذا ما صدر عنهما معاً، في الوقت نفسه، صوت «آه!»، فإن مسافراً ثالثاً موجوداً على المسافة نفسها منهما، سيستنتج بأن سقوط الحقيبتين تم في الوقت ذاته.

لكن النسبية تعلمنا بأن الأمر سيكون مختلفاً

لدى رئيس المحطة الذي بقي بالرصيف. إنه، حتى لو افترضنا بوجوده على المسافة نفسها من سقوط الحقيبتين، أثناء مرور القطار أمامه، سيرى سقوط الحقيبة الأولى، ثم يليه سقوط الثانية. وإذن، من الذي على حق؟ وهل نعتبر الحدثين، أم لا نعتبرهما متزامنين؟ في الحقيقة، إن الجميع على حق، لأنه لا يوجد معْلم مفضَّل؛ فالحدثان لا يعتبران متزامنين إلا داخل المعْلم.

تبدو النتيجة هنا مختلفة عن تلك المحصَّل عليها في النسبية الغاليلية، حيث يوجد التزامن باستقلال عن المعْلم. لكن ذلك لا يعني بأن ثمة تناقضاً بين المعالجتين، فالنسبية الأينشتاينية تشمل النسبية الغاليلية التي تصبح بمثابة رؤية تقريبية للسرعة المحدودة.

إن الحياة اليومية بما في ذلك القطار فائق السرعة، تجهل مثل هذه المآزق. ومن الناحية العددية

ستكون التأثيرات بسيطة إلى أقصى الحدود؛ ذلك أن اللاتزامن non–simultanéité المتحدث عنه من قبل، يتم في حدود 10^{-20} من الثانية، وهو تغُيّر ضعيف جداً لكي يكون قابلاً للقياس. لكننا سنلاحظ بأن التحقُّق من النتائج العملية للنسْبية، يحصل كلما كانت السرعة قريبة من سرعة الضوء.

6- أدوات النسبية

تحدثنا في النقط السابقة عن تحول المكان والزمان، لكننا تفادينا صياغة المعادلات. والآن، نرى من الضروري اعتماد هذه الصياغة من أجل فهم أفضل لما يحصل، عند الانتقال من معلم إلى آخر. لقد عالجت النسبية الغاليلية إحداثيات المكان x، y، z، بشكل مستقل عن الزمان t. بيْد أن الأمر سيتغير مع أينشتاين، فمن الآن فصاعداً، يتعين تصور مجموعة جديدة من الإحداثيات ذات أربعة أبعاد، وهي **الزمكان** x، y، z، t. والجديد هنا هو تمازج المكان والزمان داخل المعادلات، فبإمكان قليل من المكان أن «يتحول» إلى زمان، والعكس صحيح. ولتوضيح ذلك، سنقتصر على إحداثية واحدة للمكان وهي x وسنختار من خلالها سرعة التنقُّل بين المعْلمين R_1 و R_2 [كما رسمناه في الشكل

السابق]. وطبعاً لن يطرأ أي تغير على الإحداثيتين y و z. ويحصل التنقل بين المعلم R_1 $(t_1 \cdot x_1)$ والمعلم R_2 $(t_2 \cdot x_2)$ عبر علاقات تدعى **تحولات لُورَنْتز** transformations de Lorentz، نسبة إلى العالم الرياضي لورنتز الذي اقترح هذه المعادلات سنة 1904. وقد استثمرها أينشتاين بشكل مستقل ضمن نظريته، حيث تأكّدت من خلال معادلتين بسيطتين وهما: $(vt_1 - x)$ $y = x_2$ و $\square y1 \frac{v}{c2} x1 \square$ $y = t_2$. وستكون y هي الكمية الثابتة paramètre التي تقيس اقتراب v من c أي: $\frac{1}{\sqrt{1 \square \frac{v2}{c2}}}$

ويلاحَظ هنا كيف أن y تساوي 1 عندما لا تكتسي V أية أهمية لدى C.

أما صيغة $t_1 = t_2$ فسيكون الزمان من خلالها هو نفسه في المعلمين؛ وهنا نجد الشروط نفسَها المعروفة لدى غاليلي. هكذا، فإن تمدد الأزمنة الذي أثرناه

خلال سفر بولس سيفهم على الفور. لنأخذ المعلم R_1 المرتبط بالمركبة الفضائية. إن مدة السفر لدى بولس Δt_1 تساوي $t_1-'t$، وهذا هو الفاصل بين انطلاق المركبة ووصولها. أما بطرس الذي ظل بالأرض [المعلم R_2]، فإن مدة السفر Δt_2 لديه تساوي $t_2-_2't$. وسنحصل من خلال ذلك على الصيغة التالية؛ $'t_2 - t_2 = t (y'_1 - V/_C^2 x_1 t_1 + V/$
$(t_1 - {}_1'x) = y (t\, c^2$

وبالفعل، فإن x_1 المرتبطة بالمركبة لن تتغير. وسيتضح لنا بالتالي، بأن المدة تتحول وفق الصيغة: $\Delta T_2 = \Delta T_1$؛ ذلك أن y تخضع لسرعة المركبة التي اعتبرناها مساوية لسرعة 0,99 C. وبتطبيقنا لتعريف y، نحصل على قيمة تناهز سبعة. إن الزمن الذي قاسه بطرس أطول بسبع مرات من الزمن المدرك من قِبل بولس. ولا يصبح التأثير مهمّاً، إلا عند اقتراب V من C. وحتى لو افترضنا سرعة ثلاثين (30) ألف

كيلومتر في الثانية أي V=0,1C، فإن التأثير النسبي للتمدُّد يظل منحصراً في حدود 0,5٪. هكذا، فإن مدة Δ T تصبح هي: 1,005 Δ T.

وبموازاة مع تمدُّد الأزمنة، يجب علينا الإقرار **بتقلص المسافات**. ذلك أن طول شيء ما، هو الفاصل بين إحداثيتين في المكان (x–'x) وهو يتأثر بالحركة أيضاً، ويبدو أكبر في المعلم الذي يكون فيه الشيء في حال سكون، وهو ما ندعوه بالطول الخاص L_0. فالمسطرة التي يقدر طولها بمتر داخل قطار فائق السرعة، تبدو أقصر لملاحظ موجود على الرصيف وستصاغ العلاقة كما يلي: $L = \frac{h}{Y}$ بحيث ستتم البرهنة على النتيجة، كما هو الأمر بالنسبة للأزمنة.

وبالعودة إلى مثال التوأمين، سنلاحظ بأن المسافة بين الأرض ونجمة فيغا لا تتغير بمنظور بطرس الثابت على الأرض، وهي تقدر ب25,3 سنة ضوئية. أما بالنسبة لبولس، فإن المسافة المقطوعة تبدو

مُقَلَّصَة، فهي تقدر فقط ب3,6 سنوات ضوئية. وهذا أمر مفهوم، لأن معْلم بولس هو الذي تتهرب فيه الأرض من المركبة، في حين تقترب فيغا منها بسرعة C 0,99. ولما كانت السرعة هي بمثابة تغيرات تطال إحداثيات المكان بالعلاقة مع الزمان، فإن قانون التركيب النسبي للسرعة سيصاغ كما يلي:

$$V2 = \frac{(V1+V)}{1+V1*\frac{V}{C^2}}$$

، وبمثل هذه الصيغة يمكننا البرهنة بسهولة على ألا إمكان أن نضيف أو ننقص شيئاً من سرعة الضوء C. فإذا كانت V تساوي C أو إذا كانت V_1 تساوي C، فإن النتيجة ستؤدي دائماً إلى V_2=C، بمعنى أنه لا يمكن تجاوز سرعة الضوء C، باعتبارها سرعة نهائية. ويسمح هذا الأمر بحل مفارقة تجربة مايكلسن وموريي بشكل مقنع. طبعاً، يمكن تبسيط هذه الصيغة، ضمن صيغة غاليلي: V_2

= $V + V_1$ ما أن تصبح السرعة القائمة أقل من سرعة الضوء C.

7- ما هو تعليقنا على معادلة $E = mc^2$ ؟

خضع المكان والزمان إذن للتغير بفعل النسبية، فهما إما خاضعان للتمدّد أو التقلص. وهناك نتيجة أخرى تنضاف إلى أفكارنا حول كتلة الشيء. والكتلة m_0 هي الكمية الثابثة المتدخلة في الوزن مثلاً، والتي تقيس تأثير الجاذبية على الشيء، وفق الصيغة التالية: $m_0g=P$ على اعتبار أن g هي عامل الجاذبية. إن الشيء المتحرك بسرعة V، يتميز من جهة أخرى **بطاقة حركية** يعبر عنها بصيغة $½ m_0V^2$. ومع تزايد السرعة، تخضع هذه الطاقة المتزايدة للحركة وبالتالي، فإن قيمتها تتغير بحسب المَعْلم الذي تقاس فيه. كما تعلمنا النسبية بأن الطاقة والكتلة هما من طبيعة واحدة. فالمفهومان يقدمان جانبين للواقع نفسه، بمعنى أن الكتلة هي شكل خاص للطاقة. وقد تم الربط بين هذين الحجمين

بالصيغة الشهيرة التالية: $E=mc^2$. وإذن، فإن الكتلة لم تعد ثابتة، فهي مضطرة لأن تزداد مع ازدياد السرعة، ما دامت الطاقة في ازدياد. وأخذ هذا الأمر بعين الاعتبار، بإدراج الكتلة النسبية m التي ستصاغ من خلال علاقتها بكتلة الشيء الساكنة m_o كما يلي $m = ym_o$.

إن الكتلة النسبية تزداد بازدياد السرعة تناسبياً مع y. ففي السرعة الهائلة، تنعكس الطاقة الكبرى للشيء في كتلته ذاتها. وسنلاحظ من خلال هذه الصيغة، أنه إذا كانت v تساوي c، فإن $Y = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$ تصبح لامتناهية، وهو ما ينطبق بالتالي على **الكتلة النسبية**. وزيادة سرعة شيء ما إلى حدود سرعة الضوء C، تستدعي التوفر على طاقة لامتناهية، وهذا أمر مستحيل التحقق طبعاً. إن سرعة الضوء C هي إذن سرعة نهائية، لا يمكن

ملاحظتها **asymptotique** ولا بلوغها من قِبل الأشياء الكثيفة. وبصيغة أخرى، فإن الأشياء ذات الكتلة المساوية لصفر، هي التي يمكنها السفر بسرعة الضوء C داخل كل المرجعيات. وتعتبر الفوتونات Photons الجزيئات الوحيدة الحرّة التي تساوي كتلتها الصفر، كحبات ضوئية. وهذه الملاحظة منسجمة مع تسمية C سرعة الضوء. هكذا فإن صيغة $mc^2=E$ تظل صالحة دوماً، خصوصاً في حالة السكون، عندما تكون V مساوية لصفر. وهنا نحصل على الصيغ التالية $1=y$ و $m_o=m$ وبالتالي $m_oc^2=E$ فَالجُزَيء الساكن يمتلك مسبقاً طاقة، تدعى **طاقة كتلة**. وتبدو هذه الطاقة هائلة من الناحية الكمية، مقارنة بطاقات الحركة التي يمكن أن يكتسبها شيء كثيف.

إننا نرى كيف أن النسبية ألغت استقلالية مفهومي الكتلة والطاقة. فهل معنى ذلك أن

الكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة والعكس أيضاً؟ بكل تأكيد. فلو كان باستطاعتنا تحويل كل الطاقة المتضمنة في حبة نعناع من خمسة غرامات، فإننا سنضيء مصباحاً بقوة خمسين فولتا خلال 300 ألف سنة. ويكفي استغلال ثلاثين حبة نعناع لتغطية الحاجيات الطاقية اليومية لفرنسا.

من الناحية العملية، هناك معرفة بإنتاج الطاقة، انطلاقاً من الكتلة، وإن كانت بطريقة أقل فعالية من مثالنا السابق. وهو ما يتجلى في عملية **التخصيب النووي** fission nucléaire التي ترتكز عليها تكنولوجيا المفاعلات النووية. فنواة اليورانيوم تتحول إلى نواتين أخف وزناً. هكذا، تختفي الكتلة وتخلق الطاقة التي تتحول عند نهاية السلسلة إلى كهرباء. ويسمح التخصيب بتحويل جزء ضئيل من اليورانيوم إلى طاقة، علماً بأن كيلوغراماً من اليورانيوم يحرر طاقة أكبر بثلاث (3) ملايين مرة،

الطاقة التي يحررها كيلوغرام من الفحم الذي يتم حرقه.

وتوجد بالشمس ظاهرة أخرى منبثقة من صيغة $E=mc^2$ وتدعى **الانصهار النووي** fusion nucléaire، حيث ترتبط أربعة (4) بروتونات Protons فيما بينها، لتنتج نواة الهليوم hélium. وهنا أيضاً تختفي الكتلة، مما يفسر الطاقة المضيئة المنبعثة من الشمس التي تفقد أربعة ملايين طن في كل ثانية. لكن علينا ألا ننزعج، فهي ما زالت تحافظ على طاقة تسمح لها بالاشتغال مدة خمسة مليار من السنين!

ينتج تحول الكتلة إلى طاقة أيضاً من خلال التدمير المتبادل بين جزيْء وجزيْئه المضاد، مثلاً بين الإلكترون électron والبوزترون positron، مما يؤدي إلى خلق فوتونات طاقية. ولا يندرج هذا الأمر في عداد الخيال العلمي، بل هو أساس ظاهرة فيزيائية تسمح بخلق الصور الرائعة للدماغ،

حيث «تستضيء» المناطق التي حركتها المنشطات المختلفة.

هكذا، نكتشف داخل أعماق الدماغ، مخابيء الأحلام ومخابيء الاستدلال، بفضل صيغة $E = mc^2$.

وبارتباط مع ذلك، هل بإمكاننا تصور ظاهرة مُعَاكِسَة للتدمير، أي ظاهرة تحول الطاقة إلى كتلة؟ والجواب هو نعم مرة أخرى؛ وهو ما يُدعى «بتجسيد الفوتونات»، حيث تتحول الطاقة الخالصة إلى زوج من الجزيْئات الكثيفة، مؤدية على سبيل المثال، إلى وجود إلكترون وبوزترون. وقد تم التأكد من ذلك تجريبياً على مستوى مسرع القوة، وهو الذي تجسد بقوة خلال الانفجار الكوني الهائل Big Bang.

حسب المثل المنسوب إلى لفوازيي Lavoisier: «لا شيء يُخلق ولا شيء يندثر، بل كل شيء

يتحول». ونحن نرى كيف أن هذا المثال يأخذ منحى آخر مع أينشتاين، ما دام بإمكان التحول أن يمتد الآن ليشمل التبدلات بين الكتلة والطاقة.

8- والآن، لنقم ببعض التعميمات

لا تطبَّق المعطيات السابقة إلا على الانتقال بين المعالم بسرعة متماثلة لدى بعضها البعض، سواء كانت السرعة محدودة [النسبية الغاليلية] أو على العكس، قريبة من سرعة الضوء. وتدعى هذه النتيجة الأولى لنسبية أينشتاين، بالنسبية «الحصرية restreinte». طبعاً، فإن صيغ هذه الأخيرة تُختزل في صيغ الميكانيكا الكلاسيكية، عندما يتعلق الأمر بسرعة صغيرة، مقارنة بسرعة الضوء. وهذا أبسط شيء، ما دامت الميكانيكا المذكورة تعالج ظواهر الحياة اليومية إلى حدود ديناميكا النظام الشمسي. فالنظرية النسبية هي إذن نظرية أوسع، لأنها تشمل الميكانيكا الكلاسيكية داخل المجال المحدود لتطبيقاتها. مثلاً، إذا اعتبرنا شيئاً متوفراً، على طاقة كاملة mc^2، بحيث تكون الطاقة السالبة هي m_0c^2،

فإن الفارق بين الطاقة الكاملة وطاقة الكتلة يجب أن يقيس طاقة الحركة. وفي الحدّ الذي تكون فيه السرعة ضعيفة أمام سرعة الضوء، فإن هذا الفارق يستحضر نتيجة الميكانيكا الكلاسيكية وهي: $1/_2 m_0 V^2$.

والآن، لنمر إلى مرحلة جديدة. ولنتصور قطاراً عالي السرعة يقترب من موقع منحني السكة. سأكون أنا مضطر لبذل مجهود كي أظل واقفاً، لأن القوة «المُبْعِدَة عن المركز» Centrifuge تدفعني إلى الخارج، كما أشعر بأن القطار لم يعد مَعْلماً غاليلياً. فإذا كانت هناك قوة، فسيحصل تغير في الحركة، وهو ما نسميه **بتسريع الوتيرة** accélération. وقد وضح لنا نيوتن العلاقة بين هذين الحدين، فالشيء المتوفر على الكتلة m_0 والخاضع للقوة F، يكتسب التسارع a، وفق الصيغة $m_0a=F$. وبدون التسريع ستكون الحياة مملة جداً؛ وقد سعى أينشتاين إلى

توسيع صلاحية النسبية الحصرية، لتشمل هذه الوضعيات الجديدة. وفي سنة 1916 تمكن من إنجاز هذا البرنامج بالنسبية التي أصبحت تعرف الآن **بالنسبية العامة**. وبدأ تأمله مرة أخرى بـ «تجربة التفكير». لنتصور إذن ملاحظين داخل حجرتين مغلقتين، توجد واحدة منهما في وضعية ساكنة على الأرض، بحيث تخضع لقوة الجاذبية: $P=m_o g$، في حين قُذف بالثانية في الفضاء وتم إخضاعها للتسارع a، أي لقوة نيوتن: $F=m_o a$. فما الذي سيحصل إذا كانت a تساوي g؟

إن كرة مرمية داخل الحجرتين ستتبع المسير نفسها، ولا يمكن للملاحظ أن يؤكد الوضعية التي يوجد فيها؛ وهو ما يسمى **بمبدأ التكافؤ** principe d'équivalence. وماذا عن الضوء؟ في الحجرة الخاضعة للتسريع، سيكون الضوء منحنياً بفعل التنقل. وبالفعل، فإذا كانت الحزمة المضيئة

fuseau lumineux قد أرسلت بشكل متواز مع السقفية، فإن الاصطدام بالحائط سيكون منحرفاً بفعل حركة السور. وسيقول أينشتاين بهذا الخصوص، بأنه يجب علينا تطبيق الشيء نفسه على الحجرة الخاضعة لحقل الجاذبية champ gravitationnel وحده، أي الموجود في وضعية ساكنة على الأرض.

وكانت النتيجة ثورية، فالضوء يتأثر بالجاذبية، وهناك تفاعل بين الإشعاع والكتلة. وهذه النتيجة الهائلة، مقترنة بالنسبية العامة. لكن، كيف يمكن البرهنة على ذلك؟ طبعاً، يتعين التوفر على كتلة مهمة، للتأثير بشكل ملموس على مسير الضوء. وأكبر كتلة متوفرة بالقرب منا هي كتلة الشمس. وقد اقترح أينشتاين، بهذا الصدد، القيام بعملية تجريبية تتعلق بانجذاب ضوء نجمة عند مرورها قرب الشمس. وأجرى التجربة بنجاح العالم

البريطاني إدنغتون Edington في شهر مايو 1919، خلال كسوف تام للشمس. وكان الكسوف ضرورياً لاكتشاف الوجه الآخر للنجوم المخفية بفعل لمعان الشمس. هكذا، وجه العالم الفلكي منظاره نحو مجموعة نجوم الثور وقاس بدقة وضعية النجوم القريبة من الشمس خلال الكسوف. بعد ذلك، قارن النتيجة بالخريطة المحصل عليها خارج الكسوف، ولاحظ بأن حضور الشمس يحرك الصور وبأن النجوم تبدو متحركة باتجاه الخارج. لقد كان الضوء المنبعث من هذه النجوم ينجذب عند مروره قرب الشمس، وبذلك أعاد خلال الكسوف، بناء نقطة ظاهرة وخارجية بشكل أكبر. وتم التحقق بدقة من التوقع الحسابي للمسير داخل حقل جاذبية للشمس. وبذلك، منح التأكيد التجريبي المذكور شهرة واسعة للنسبية العامة. وقد عبر العالم الرياضي والفيلسوف الإنجليزي وايتهيد

Whithead الذي عايش فترة الاحتفاء بهذه النظرية، عن إعجابه بها خلال جلسة تقديم التقارير بالملتقى التاريخي للجمعية الملكية لعلم الفلك، قائلاً: «إن قوانين الفيزياء هي مراسيم المصير». بعد هذا النجاح الباهر، أصبح أينشتاين بطلاً لدى وسائل الإعلام، وسيظل عالماً نموذجياً في القرن العشرين.

لقد جمعت النسبية الحصرية بين المكان والزمان من جهة وبين الطاقة والكتلة من جهة أخرى. ومع النسبية العامة، اقترح أينشتاين تقارباً جديداً بين الزمكان والكتلة الطاقة masse–énergie؛ بحيث أصبح المفهومان غير منفصلين. وعندما سئل أينشتاين عن هذا الإجراء، أجاب قائلاً: «فيما قبل، كان الاعتقاد السائد هو أن كل الأشياء الطبيعية إذا اختفت من الكون، فسيبقى المكان والزمان. ومع النسبية، سيختفيان بالتزامن مع اختفاء المادة».

هكذا، سترتكز المسلمة الأساسية للنسبية على

واقعة كون كل حضور للكتلة الطاقة في الزمكان، يؤثر على الهندسة ذات الأبعاد الأربعة أو **الهندسة الكرونولوجية** Chrono géométrie، وذلك بتغيير شكلها من حالة السكون المقبولة داخل الزمكان الفارغ من المادة، إلى الحالة «المنحنية». وهو ما يعتبر توحيداً عميقاً للأصناف الأربعة. فلن يعود الزمكان بنية متحجرة، بل مرنة ومتأثرة بحضور الكتلة الطاقة. وسيخلق كل جسم مادي من حوله، نوعاً من الضغط الذي يحول خصائص المكان. ولكي يدرَك هذا المفهوم حدسياً، يتم الرجوع إلى صورة مساحة مرنة، مستوية وأفقية في البداية، لكنها ستنحني فيما بعد، تحت تأثير كتلة معينة [كرة حديدية موضوعة فوق بساط مثلاً]. وضمن هذه الهندسة الكرونولوجية، يتبع الضوء أقصر مسافة بين نقطتين، لكن عند المرور قرب كتلة مهمة، لن تصبح هذه المسافة عبارة عن خط مستقيم.

فانسياب الزمن نفسه، يخضع لحضور الكتل. وإذا ما استحضرنا مثال التوأمين بطرس وبولس، فإننا سندرك بأنه لم تعد هناك حاجة لسفر أحدهما، كي يبدو لهما اختلاف الزمن. هذا الأخير يمر ببطء أكبر عندما نكون أقرب إلى انتشار الكتلة الطاقة. فإذا بقي بطرس في السهل وصعد بولس إلى جبل شاهق مثلاً، فإن الجبلي الأبعد عن مركز الأرض، سيتعرض للشيخوخة قبل أخيه بطرس.

ثمة توقع آخر منبثق عن النسبية العامة، ويتمثل في وجود موجات تغير شكل الزمكان، وتنتشر خلال ارتجاج الزمن بفعل تحول مصدر كثيف جداً للكتلة الطاقة. وهو ما يتجلى في ظاهرة موجات الجاذبية الناتجة عن التفاعل العنيف بين نجمتين، تدور كل واحدة منهما حول الأخرى. وقد تم تأكيد وجودهما بطريقة غير مباشرة في البداية، مما استلزم اكتشافهما بشكل مباشر فيما بعد، حيث

تطلَّب الأمر ملاحظة مستمرة لهندسة الزمكان.

أما على مستوى الأرض، فسيكون الأمر ممكناً في أجل قريب، بفضل استخدام آلات دقيقة لقياس التفاعلات الضوئية، شبيهة بآلة مايكلسن ومورلي، مع فارق أساس هو أن يبلغ طولها عدة كيلومترات. وتوجد بهذا الخصوص، محطة أوروبية للمراقبة، قرب مدينة بيزا الإيطالية وتدعى فيرغو Virgo. وهي تنتظر هذا الاضطراب المتوقع في الفضاء، الذي سيكون من نتائجه حدوث تغيرات طفيفة على طول كل ذراع من أذرع الآلة.

9- الكون النسبي

توجد في الوضعيات المألوفة اختلافات قليلة بين نتائج الميكانيكا الكلاسيكية ونتائج النسبية. ومع ذلك، يجب أن يؤخذ ذلك بعين الاعتبار من قبل النظام الموقعي الشامل Global Positioning System (GPS)، المكون من مجموعة من الأقمار الاصطناعية التي تدور حول الأرض. ويرتكز هذا النظام على الاستقرار الكبير للساعات الموجودة بهذه الأقمار الاصطناعية والتي تتعرض لتغيرات أصغر بعشرة آلاف مرة، من التغيرات الناجمة عن النسبية، على اعتبار أن مرور الوقت بالقمر الاصطناعي يختلف عن مروره على الأرض.

وإذا تركنا هذا المثال جانباً، فإن المجال المفضل للنسبية العامة، يظل هو الكون. فقد عملت هذه النظرية على تثوير فهمنا للكون؛ وبمقتضاها يولّد

مرور الزمن انفصالات مكانية أكبر فأكبر، بمعنى أن هناك خلقاً مستمراً للمكان. وقد انتبه أينشتاين نفسه إلى كون النسبية وضعت إطاراً لنظرية كونية شاملة [كوسمولوجيا]، لكنه رفض في مرحلة أولى فكرة كونٍ غير ثابث. ووجب انتظار مساهمة العالم الروسي فريدمان Friedmann والعالم البلجيكي لوميتر Lemaitre، اللذين برهنا على أن معادلات النسبية العامة تؤدي بطبيعة الحال إلى كون متطوّر زمنياً. وقد تم التحقق من هذا التوقع، فنحن نعلم اليوم بأن حجم الكون برمته، يتزايد وفق منظور النسبية العامة. وهو ما تجلى في مفهوم الانفجار الكوني الهائل (البينغ بانغ)، الذي تم التأكد منه، عبر حزمة من المعطيات الملاحظة. كانت الكتلة الأولية مركَّزة في حجم محدود مليء بغاز ساخن ومكثف بشكل كبير. بعد ذلك، اتسع الفضاء **[ومازال يتسع]** والتحمت المادة التي انخفضت حرارتها وشكلت

مجرات انقسمت بدورها إلى نجوم. ولا يمكن فهم المعطيات الكونية الحالية إلا في هذا الإطار.

وهناك توقع آخر، ناجم عن النسبية العامة يخص الثقوب السوداء. فإذا أصبحت الكتلة المتراكمة كثيفة عند الانفجار الداخلي لنجمة في مراحلها الأخي مثلاً، فإن كتلتها ستتمركز داخل حجم مختزل وسيصبح ضوءها منحنياً بالداخل، بحيث يستحيل عليه التسرُّب. هكذا فإن ما تبقّى من النجمة لا يرسل أي ضوء ويصبح بالتالي ثقباً أسود يتم اكتشافه فقط، من خلال تأثيراته الانجذابية على الأشياء المجاورة له. وتقدم لنا النظرية حجم هذا الثقب، فهو يتقلص إلى حجم جوزة مقارنة بكتلة الأرض برمَّتها. إن الكرة التي تكونت بهذا الشكل ستغير موضعياً بنية الزمكان عن طريق الجاذبية. ولقد تم التأكد من هذه الظاهرة التي كانت افتراضية من قبل؛ فهناك كمية كبيرة من هذه الثقوب بالكون؛ ويعتبر مركز مجرّتنا

موقعا site لثقب أسود يزن عدة ملايين من الكتل الشمسية. كما تعتبر الثقوب السوداء الكثيفة بشكل كبير، بمثابة «غيلان» ogres حقيقية داخل الكون. وإذا ما مرّت نجمة بالقرب منها، فإن تأثير الجاذبية عليها يمكن أن يؤدي إلى تدميرها؛ وقد ترسل المادة المنزوعة إشارة «استغاثة» قبل ابتلاعها؛ وهي إشارة أخيرة بالأشعة السينية rayons x، يستطيع المنظار تلقيها.

النسبية العامة إذن عبارة عن بناء فكري رائع. ولكم كانت سعادة أينشتاين كبيرة عندما أحس بتجمع عناصر نظريته، كي تقدم نظرة منسجمة حول الظواهر التي تتضمن في طياتها معطيات رائعة، مثل انحراف الضوء أو تمدُّد الأزمنة، أكدتها التجارب الدقيقة فيما بعد! ونرى من المفيد تقريب مفهوم الزمكان الرباعي البُعد لأينشتاين، من حدْس معاصره مارسيل بروست Marcel Proust الذي

كتب عن كنيسة طفولته ما يلي: «كل ذلك جعل منها شيئاً مختلفا تماما عن باقي المدينة. فهي بناء يشغل، إن صح التعبير، مكاناً بأربعة أبعاد – ما دام البعد الرابع هو الزمان – وهي تعرض سفينتها عبر القرون، متنقلة من صحن إلى آخر ومن معبد إلى آخر، حيث لا تتجاوز ولا تجتاز بعض الأمتار فقط، بل تمر عبر عصور متوالية، لتخرج منتصرة في الأخير». إن سمو الفكر الإنساني يتمثل في فهم هذا الكون الذي يأوينا والتحكم فيه. وبطبيعة الحال، فإن الاكتشاف لم يكتمل بعد. والتقدم الحاسم في بداية القرن العشرين والذي تجلى في النسبية من جهة، وفي النظرية الكوانطية من جهة أخرى، يضع القرن الحادي والعشرين أمام تحدٍّ كبير، وهو خلق التوافق بين هاتين الثورتين الفكريتين العظيمتين. النسبية هي مجال التفاعل التجاذبي، المرتبط بموضوعات الفيزياء الفلكية الكبرى. أما

مجال تطبيق الميكانيكا الكوانطية فهو التفاعل بين الجزيئات الذرية الدقيقة. والحال، أن النظريتين غير متفقتين رياضياً. وقد حاول أينشتاين في أواخر حياته، الجمع بين هذين الحدّين المعرفيين في الإطار المفهومي نفسه؛ واشتغل على نظرية تجمع الجاذبية بالتفاعلات الأخرى. بيد أن نتائج هذا العمل ظلت غير معروفة. ومع ذلك، تبدو في الأفق نظرية حاسمة في طور الاختمار، تسمى «نظرية الحبال» Théorie des cordes، حيث تتحول فيها الأشياء الأولية إلى أنماط من الاهتزازات. ويعمم هذا المفهوم فكرة النسبية العامة التي مفادها ألا وجود لبنية صلبة، لأن كل شيء قابل للتغير على مستوى الشكل. وتتوقع هذه النظرية الجديدة وجود زمكان بأحد عشر بعداً. وهو ما يتجاوز نظرية أينشتاين، لكن هذه الأبعاد الإضافية لا تتدخل إلا في حدود صغيرة، وهي لا تؤثر في حياتنا اليومية، كما أنها

تظل ضرباً من التأمل إلى حدّ الآن.

يتضح لنا كيف أن الفيزيائيين ما زالوا مطالبين بالقيام بمجهودات كبيرة، لكنهم متعودون على حل الألغاز ومواجهة التحديات. ولربما حقق القرن الحادي والعشرون ما اعتقد فيزيائيو القرن التاسع عشر أنهم بلغوه، ونقصد بذلك تفسيراً عقلانياً وكاملاً للعالم المحيط بنا. وفي جميع الأحوال، فإن الإنسان يقترب تدريجياً من هذا التفسير.

ثبت المصطلحات

A	
Accélération	تسريع (الوتيرة) ع
A priori	قبْلي
C	
Coordonnées	إحداثيات
Centrifuge	مبعد عن المركز
Chrono géométrie	هندسة كرونولوجية
D	
Dilatation	تمدّد
F	
Fuseau lumineux	حزمة مضيئة
Fusion nucléaire	انصهار نووي
Fission nucléaire	تخصيب نووي
I	
Implosion	انفجار من الداخل
Inertie	قصور

P	
Parabolique	منحني
Perpendiculaire	متعامد
Pesanteur	ثقالة
Principe d’équivalence	مبدأ التكافؤ
Q	
Quadridimensionnel	رباعي الأبعاد
R	
Relativité	نسبية
Relativité restreinte	نسبية حصرية
Relativité générale	نسبية عامة
Relativisme	نزعة نسبية
Sens commun	فهم مشترك
Simultanéité	تزامن
V	
Vibration	اهتزاز

البيليوغرافيا:

ضمن السلسلة نفسها:

- Jean Louis Bobin, *Quelle est la vraie vitesse de la lumière*? n° 54, 2004.
- Alain Bouquet, *Doit-on Croire au Big Bang*? n° 23, 2003.

– ولمزيد من المعرفة:

- Albert Einstein, *La Relativité*, Payot, 1990.
- Philippe Frank, *Einstein*, Falmmarion, «champs», 1991.
- Thibaut Damour, *La Relativité générale*, Odile Jacob, 2000.

هذا الكتاب

يتناول هذا الكتاب، بأسلوب علمي مبسط، أحد الإنجازات الثورية المهمة في تاريخ العلم، ألا وهي نظرية النسبية لأينشتاين. وهي النظرية التي أعادت النظر في مفاهيم فيزيائية مركزية، مثل المكان والزمان والحركة والسرعة والطاقة والمادة، حيث تم بشكل مثير، الجمع بين المكان والزمان من جهة وبين الكتلة والطاقة من جهة أخرى. وهو ما عبر عنه أينشتاين نفسه بصيغة عميقة جاء فيها ما يلي: « من قبل كان الاعتقاد السائد هو أن كل الأشياء الطبيعية إذا ما id اختفت من الكون، فإن المكان والزمان سيبقيان. ومع النسبية، فإنهما سيختفيان بالتزامن مع اختفاء المادة».

إن مثل هذه التصورات ستغني حقل العلوم الفيزيائية والفلكية والرياضية وستفتح المجال أمام

إنجازات وابتكارات علمية هائلة.

وقد أكد المؤلف بهذا الصدد، على أن التقدم العلمي المهم في بداية القرن العشرين والذي تجلى في النظرية النسبية من جهة، وفي النظرية الكوانطية (الكمية) من جهة أخرى، سيضع القرن الحادي والعشرين أمام تحديات كبيرة، تتمثل في تحقيق التكامل بين هاتين الثورتين العلميتين العظيمتين.

النسبية هي مجال تفاعل الموضوعات في العالم اللا متناهي الكبر (أي الكون الشاسع) والفيزياء الكوانطية هي مجال تفاعل الموضوعات في العالم اللا متناهي الصغر (عالم الجزيئات)، ومن المتوقع أن يساهم تضافر جهود العلماء ضمن هذين المجالين، في إنجاز تفسير عقلاني متكامل للعالم المحيط بنا.

نبذة عن المؤلف:

فرانسوا فانوتشي، أستاذ الفيزياء النووية بجامعة باريس 7 وباحث بمختبر الفيزياء النووية بالمركز الوطني للبحث العلمي.

نبذة عن المترجم:

د. عز الدين الخطابي، تابع تكويناً فلسفياً وسوسيولوجياً. وهو حائز على الدكتوراه في الإثنولوجيا من جامعة نيس سنة 1990. أصدر العديد من المؤلفات في مجالات التربية والاجتماع والفلسفة. كما ترجم عدة مؤلفات لمفكرين وفلاسفة غربيين. أمثال جاك دريدا وهابرماس. وجيل دولوز. وإيمانويل ليفناس وغيرهم.



ما النِّسْبِيَّة؟

يتناول هذا الكتاب، بأسلوب علمي مبسط، أحد الإنجازات الثورية المهمة في تاريخ العلم، ألا وهي نظرية النسبية لأينشتاين، وهي النظرية التي أعادت النظر في مفاهيم فيزيائية مركزية، مثل المكان والزمان والحركة والسرعة والطاقة والمادة، حيث تم بشكل مثير، الجمع بين المكان والزمان من جهة وبين الكتلة والطاقة من جهة أخرى، وهو ما عبر عنه أينشتاين نفسه بصيغة عميقة جاء فيها ما يلي: « من قبل كان الاعتقاد السائد هو أن كل الأشياء الطبيعية إذا ما اختفت من الكون، فإن المكان والزمان سيبقيان، ومع النسبية، فإنهما سيختفيان بالتزامن مع اختفاء المادة».








9789948170358